

ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ КРИТЕРИЮ

В работе определены условия уменьшения тепловой напряженности финишной обработки лезвийными и абразивными инструментами и произведен выбор рациональной структуры и параметров операций финишной обработки по температурному критерию

Традиционно задачи повышения качества обработки решаются за счет снижения режимов резания [1]. Однако это, как известно, ведет к уменьшению производительности обработки и малоэффективно. Гораздо эффективнее использовать более прогрессивные методы обработки, для чего необходимо знать их технологические возможности, уметь проводить сопоставимые сравнения и выбор оптимальных вариантов обработки на основе математического (аналитического) представления физических и технологических параметров обработки. Все это требует обоснования технологических закономерностей формирования параметров качества при абразивной и лезвийной обработках с учетом температурного фактора, что позволит произвести выбор рациональной структуры и параметров операций. Важными решениями в этом плане следует рассматривать результаты исследований теплофизики процессов механической обработки, в особенности мгновенной и средней температур при шлифовании, которые (по мнению проф. Маслова Е.Н.) в совокупности позволяют раскрыть физическую сущность тепловых процессов при шлифовании и определить условия повышения качества и производительности обработки, однако не достаточно изучены и требуют дальнейших исследований. В связи с этим целью работы является повышение качества и производительности обработки на основе анализа тепловой напряженности финишной механической обработки и обоснованного выбора рациональной структуры и параметров операций.

В работе приведена разработанная математическая модель определения мгновенной и средней температур при шлифовании, а так же глубин проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали. Математическая модель основана на результатах исследований [2] баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь. На первом этапе работы определены мгновенная температура θ и глубина l_2 проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при микрорезании единичным зерном на основе расчетной схемы (рис. 1), в которой снимаемый припуск условно представлен множеством бесконечно тонких адиабатических стержней, которые перерезаются со скоростью $V_{рез}$, определяющей ско-

рость перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали:

$$\theta = \theta_{\max} \cdot z; \quad l_2 = a \cdot \frac{z}{\bar{l}_1}; \quad \bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot a \cdot V_{\text{рез}} = -\ln(1-z) - z, \quad (1)$$

где $\theta_{\max} = \sigma / c \cdot \rho$ – максимально возможная мгновенная температура, К; σ – условное напряжение резания, Н/м²; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; z – относительная величина температуры, изменяется в пределах 0...1; \bar{l}_1 – безразмерная величина; a – толщина среза, м; $V_{\text{рез}} = V_{\text{кр}} \cdot \text{tg} \beta$; $V_{\text{кр}}$ – скорость круга, м/с; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

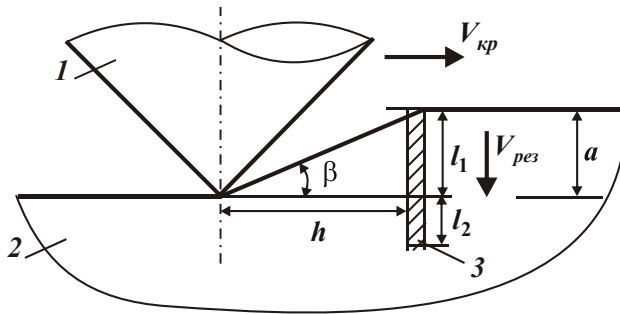


Рис. 1. Расчетная схема процесса микрорезания отдельным зерном: 1 – режущее зерно; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень ($l_1 = a$ – длина перерезанной части стержня; l_2 – длина стержня, равная толщине поверхностного слоя обрабатываемой детали, в котором концентрируется выделяющееся при резании тепло).

Расчетами установлено, что с увеличением скорости круга $V_{\text{кр}}$ и толщины среза a относительная величина температуры z непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице, рис. 2,а. В этом случае практически все тепло, выделяющееся при резании, уходит в образующуюся стружку. В обрабатываемую деталь уходит незначительная часть тепла. Параметр l_2 с увеличением скорости круга $V_{\text{кр}}$ уменьшается, а с увеличением толщины среза a увеличивается, рис. 2,б. Из этого вытекает, что уменьшить параметр l_2 и добиться повышения качества обработки можно за счет существенного увеличения скорости круга $V_{\text{кр}}$ – путем перехода в область высокоскоростного шлифования, обеспечивая при этом мгновенную температуру θ ниже температуры плавления обрабатываемого материала. Для выполнения данного условия, исходя из зависимости (1), необходимо уменьшить условное напряжение резания σ , определяемое зависимостью:

$$\sigma = \sigma_{сж} \cdot \operatorname{tg} \left(45^{\circ} + \frac{\Psi - \gamma}{2} \right) = \sigma_{сж} \cdot \operatorname{ctg} \beta = \frac{\sigma_{сж}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2} \right), \quad (2)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; γ – положительный передний угол режущей части инструмента (абразивного зерна); ψ – условный угол трения передней поверхности инструмента с образующейся стружкой; $K_{рез} = P_z / P_y$ – коэффициент резания; P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н.

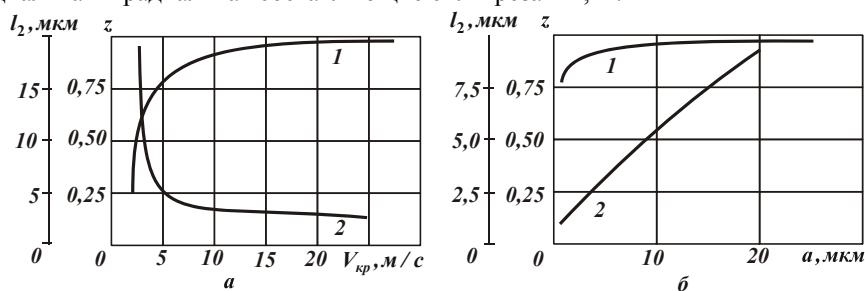


Рис. 2. Зависимости относительной величины температуры z (1) и параметра l_2 (2) от скорости круга $V_{кр}$ (а) и толщины среза a (б): а – $a = 0,05$ мм; б – $V_{кр} = 27,5$ м/с.

Это достигается уменьшением разности углов ($\psi - \gamma$) или соответственно увеличением условного угла сдвига обрабатываемого материала β (коэффициента резания $K_{рез} > 1$). При отрицательных передних углах γ , что характерно для шлифования, разность углов ψ и γ определяется выражением ($\psi + \gamma$), уменьшить которое можно, во-первых, уменьшением интенсивности трения режущего зерна с обрабатываемым материалом за счет применения эффективных технологических сред, во-вторых, за счет поддержания высокой остроты режущих зерен (уменьшая отрицательный угол γ). Расчетами установлено, что при относительно небольших значениях коэффициента трения $f = \operatorname{tg} \psi$ обрабатываемого и инструментального материалов выполнить условие $K_{рез} > 1$ можно даже при отрицательных передних углах инструмента, рис. 3,а. А это, исходя из рис. 3,б, приводит к тому, что мгновенная температура θ принимает значения меньше температуры плавления $\theta_{пл} = 1500^{\circ}\text{C}$ обрабатываемого материала – стали ШХ15.

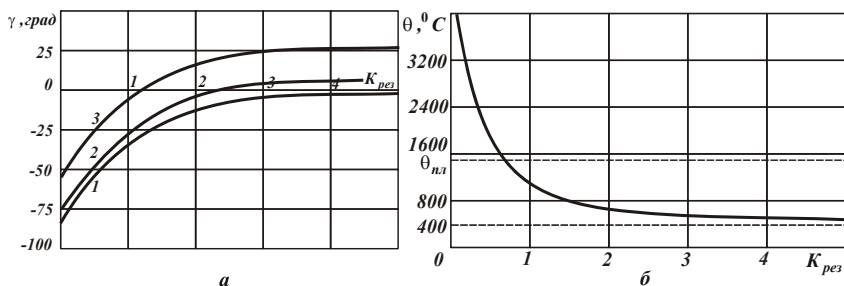


Рис. 3. Зависимости угла γ (а) и мгновенной температуры θ (б) от $K_{\text{рез}}$: а – 1 – $\psi = 10^\circ$ ($f = 0,176$); 2 – $\psi = 20^\circ$ ($f = 0,364$); 3 – $\psi = 40^\circ$ ($f = 0,839$).

Из зависимости (1) вытекает, что чем меньше условное напряжение резания $\sigma = \sigma_{\text{сж}} / \text{tg}\beta$, тем больше относительная величина температуры z и меньше параметр l_2 . Следовательно, уменьшение σ позволяет одновременно уменьшить параметр l_2 и мгновенную температуру θ , что подтверждается экспериментальными данными, приведенными в научно-технической литературе.

Как известно, при шлифовании режущие зерна круга контактируют не с “холодным”, а с “горячим” обрабатываемым материалом. Вследствие этого, мгновенная температура будет больше, чем при микрорезании единичным зерном. Это вытекает из зависимости (1), рассматривая в ней вместо толщины среза a глубину шлифования t . Очевидно, относительная величина температуры z увеличивается, что ведет к увеличению мгновенной температуры θ .

Установлено, что средняя температура при шлифовании, как и мгновенная температура, аналитически описывается зависимостью (1), рассматривая в ней вместо толщины среза a глубину шлифования t и представляя скорость $V_{\text{рез}}$ в виде: $V_{\text{рез}} = V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{t / 2 \cdot R_{\text{кр}}}$, где $V_{\text{дет}}$ – скорость детали, м/с; $R_{\text{кр}}$ – радиус круга, м. Поскольку $V_{\text{кр}} > V_{\text{дет}}$, $\text{tg}\beta > \sqrt{t / 2 \cdot R_{\text{кр}}}$, то мгновенная температура при шлифовании (кривая 1 на рис. 4,а) будет больше средней температуры (кривая 2 на рис. 4,а), а глубина проникновения мгновенной температуры в поверхностный слой обрабатываемой детали l_2 , наоборот, меньше глубины проникновения средней температуры (рис. 4,б), которая может многократно превышать глубину шлифования t . Это хорошо согласуется с известными экспериментальными данными.

Следовательно, средняя температура является определяющей при формировании параметров качества обработки при шлифовании и поэтому ее необходимо уменьшать.

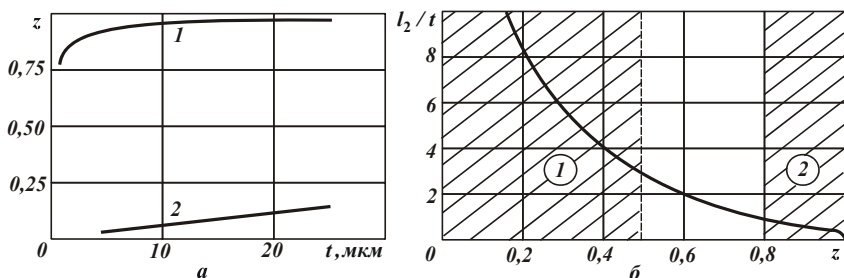


Рис. 4. Зависимости z от t (а) и l_2/t от z (б): а – $1 - V_{кр} = 27,5$ м/с; $tg\beta = 0,25$; $2 - V_{дем} = 30$ м/мин; диаметр круга $D_{кр} = 0,45$ м; обрабатываемый материал – сталь ШХ15 (коэффициент температуропроводности $a = \lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с); б – 1 и 2 определяют диапазоны изменения средней и мгновенной температуры.

Установлено, что с физической точки зрения средняя температура обусловлена процессом трения круга с обрабатываемым материалом. При отсутствии трения средняя температура фактически равна нулю и тепловую напряженность процесса будет определять мгновенная температура, что способствует повышению качества обработки. При наличии трения круга с обрабатываемым материалом уменьшить глубину проникновения средней температуры в поверхностный слой обрабатываемой детали l_2 (аналогично уменьшению глубины проникновения мгновенной температуры) можно увеличением скорости детали $V_{дем}$ при одновременном уменьшении глубины шлифования t . Это вытекает из полученных приближенных аналитических зависимостей [3–5] для определения средней температуры при шлифовании θ и параметра l_2 , которые справедливы для условия $z < 0,6$:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot z}{c \cdot \rho} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot t \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{\frac{t}{2R_{кр}}}}, \quad l_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\sqrt{2t \cdot R_{кр}}}{V_{дем}}}. \quad (3)$$

Исходя из этого, уменьшить параметр l_2 и мгновенную температуру наиболее просто в условиях лезвийной обработки, в особенности при высокоскоростном фрезеровании. При этом фактически исключается средняя температура, которая при шлифовании обусловлена трением связи круга с обрабатываемым материалом. В результате мгновенная температура будет ниже температуры плавления обрабатываемого материала, а качество и производительность обработки выше, чем при шлифовании, что подтверждается практическими данными.

Для оценки достоверности теоретических решений были проведены экспериментальные исследования круглого внутреннего шлифования кругом ЧК 50х25х13 25А 25П СМ1 7 на станке с ЧПУ модели “Studer” детали из труд-

нообрабатываемой цементированной стали 16ХЗНВФМБ-Ш. Установлено, что в широких диапазонах изменения параметров режимов шлифования образуются прижоги и происходит растрескивание обрабатываемого материала, обусловленное температурным фактором. Глубины проникновения прижогов составляют 100...200 мкм. Это значительно больше глубины шлифования, изменяющейся в пределах 1 мкм, т.е. справедливо соотношение $l_2/t > 1$, что указывает на определяющую роль в образовании прижогов средней температуры, обусловленной трением круга с обрабатываемым материалом. Установлено, что исключить температурные дефекты на обрабатываемых поверхностях в процессе шлифования можно, во-первых, за счет снижения интенсивности трения круга с обрабатываемым материалом, применяя для этого среднемягкие круги, импрегнированные (термообработанные) круги, а также твердые смазки в зоне шлифования. Во-вторых, за счет уменьшения скорости круга до значений 18...20 м/с в связи с тем, что в зоне шлифования имеет место достаточно интенсивное трение круга с обрабатываемым материалом. В итоге увеличена предельная скорость радиальной подачи (до значения 0,22 мм/мин) и соответственно производительность обработки.

Были определены значения отношения l_2/t на основе экспериментальных данных, установленных разными авторами. Так, по данным Филимонова Л.Н. при круглом наружном абразивном скоростном шлифовании стали отношение $l_2/t = 3...8$. По данным Якимова А.В. при плоском абразивном шлифовании стали отношение $l_2/t = 4...8$. По данным Попова С.А. при алмазном шлифовании по упругой схеме твердого сплава отношение $l_2/t > 10$. По данным Грабченко А.И. при точении стали резцами из СТМ отношение $l_2/t = 0,5...2$. Как видно, при шлифовании отношение l_2/t значительно больше единицы, тогда как при лезвийной обработке (точении) оно соизмеримо с единицей.

Нами были проведены экспериментальные исследования высокоскоростного фрезерования ($n = 8000$ об/мин) глухих отверстий в деталях из стали 7ХГ2ВМФ-Ш твердостью HRC 51...56 на станке "Рисомах 60" с целью определения отношения l_2/t . Станок "Рисомах 60" обеспечивает движение фрезы по контуру, описывающему окружность с заданным радиусом, т.е. происходит своего рода "расфрезерование" отверстия с круговой подачей S . Одновременно производится вертикальная подача. Данная схема обработки фактически соответствует схеме круглого внутреннего продольного шлифования. В результате установлено, что отношение $l_2/t = 0,5...1$, т.е. достигаются еще меньшие значения l_2/t , чем при обычной лезвийной обработке. Следовательно, разработанная в работе математическая модель определения мгновенной и средней температур и глубин их проникновения в поверхностный слой обрабатываемой детали позволяет научно-обоснованно подойти к выбору условий повышения качества и производительности обработки.

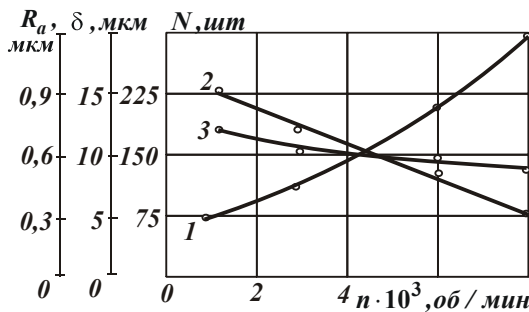


Рис. 5. Влияние частоты вращения фрезы n на количество обработанных одной фрезой отверстий N (1), отклонение от цилиндричности отверстия δ (2), параметр шероховатости обработки R_a (3): глубина резания $t=0,15$ мм; круговая подача $S=0,25$ мм/об; вертикальная подача — 125 мм/мин; снимаемый припуск — 0,3 мм.

Кроме того, в ходе экспериментальных исследований высокоскоростного фрезерования глухих отверстий установлено, что с увеличением частоты вращения фрезы n количество обработанных отверстий N одной фрезой из твердого сплава ВК8 увеличивается (рис. 5), отклонение от цилиндричности отверстия δ уменьшается, принимая значения меньше 0,01 мм, а параметр шероховатости обработки R_a стабильно изменяется в пределах 0,63 мкм. Это полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к финишной обработке рассматриваемых отверстий, т.е. после сверления для получения требуемых геометрических параметров отверстия достаточно применить лишь его высокоскоростное фрезерование. Это является принципиально новым направлением в механообработке и позволяет, например, с высокой эффективностью заменить традиционно применяемую технологию, включающую растачивание и последующее хонингование.

Список литературы: 1. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В.Н. Бакуля. — К.: Наук. думка, 1976. — 351 с. 2. Новиков Ф.В. Математическая модель определения температуры при шлифовании на основе учета баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. — 2007. — Вип. 61. — С. 23-33. 3. Новиков Ф.В., Рябенков И.А. Расчет температуры шлифования и глубины ее проникновения в поверхностный слой обрабатываемой детали // Восточно-европейский журнал передовых технологий, №1/2 (31), 2008. — С. 9-12. 4. Рябенков И.А. Определение условий уменьшения температуры шлифования и глубины ее проникновения в поверхностный слой обрабатываемой детали // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. — Харків: НТУ «ХПІ». — 2008. — № 23. — С. 16-21. 5. Новиков Ф.В., Рябенков И.А. Определение путей уменьшения температуры и повышения производительности при механической обработке // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: машинобудування, машинознавство. Випуск 5 (139). — Донецьк: ДонНТУ, 2008. — С. 56-60.

Поступила в редколлегию 11.12.08